

СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДИНАМИЧНИ ПАРАМЕТРИ НА ТОКОПРИЕМНИК НА ТРАМВАЙ

Емил Йончев¹, Емил Михайлов², Рашко Владимиров³, Росен Милетиев⁴

¹ ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев 158, София, България

² ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев 158, София, България

³ ВТУ „Тодор Каблешков“, ул. Гео Милев 158, София, България

⁴ Технически Университет – София, бул. "Кл. Охридски" 8, София, България

*кореспондиращ автор: e_iontchev@yahoo.com

MEASUREMENT SYSTEM FOR DYNAMIC PARAMETERS OF A TRAM PANTOGRAPH

Emil Iontchev¹, Emil Mihaylov², Rashko Vladimirov³, Rosen Miletiev⁴

¹ Todor Kableshkov University of Transport, 158 Geo Milev Str., Sofia, Bulgaria

² Todor Kableshkov University of Transport, 158 Geo Milev Str., Sofia, Bulgaria

³ Todor Kableshkov University of Transport, 158 Geo Milev Str., Sofia, Bulgaria

⁴ Technical University of Sofia, 8 Kl. Ohridski Blvd, Sofia 1000, Bulgaria

*Corresponding author: e_iontchev@yahoo.com

Abstract In recent years an increasing number of pantograph failures in tram cars (TC) in Sofia has been observed. To investigate the forces acting on the pantograph, a dedicated measurement system has been designed and implemented. The system captures static and linear accelerations, as well as angular velocities along three axes. From the measured accelerations, the acting forces on the pantograph are derived, while the combined data from the gyroscope and accelerometer are employed to calculate the Euler angles.

The measurement platform is based on the RedBoard-ESP32 development system, integrating the Bosch BNO055 sensor and an SD card for data acquisition. All components are housed within a metal enclosure to ensure full autonomy and to provide shielding against electromagnetic interference. The device is mounted beneath the pantograph slider. Additionally, a navigation receiver, installed on the roof of the tram car, records both temporal and positional data during the experiments. Custom software applications have been developed for the processing of the collected sensor and navigation data. These tools enable detailed analysis by allowing the retrieval of sensor information for specific points or sections along the tram route.

Keywords: inertial sensors, microcontrollers, tram cars, navigation receivers.

ВЪВЕДЕНИЕ

Захранването на трамвайните мотриси (ТМ) с тягово напрежение се осъществява с токоприемници, монтирани на покрива. Те имат различна конструкция в зависимост от конкретните изисквания, свързани със скоростта на движение на возилото, конструкцията на контактната

мрежа и други фактори. Тя е разчетена за устойчивост на надлъжни и вертикални сили при движение, т.е. натоварванията при потегляне и спиране и от натиска върху контактния проводник. В последните години се наблюдава увеличение на броя на повредите по токоприемниците

на трамвайните мотриси в град София. Най-често повредите са: поява и развитие на пукнатини по елементите на токоприемника; повреди по шарнирите; деформации на по-тънките елементи в горната част; повреди по свързващите елементи и механизмите на стойката на плъзгачите [1]. В железопътния транспорт са разработени системи, с които постоянно се следи състоянието на контакта между плъзгачите на токоприемника и контактния проводник [2, 3, 4, 5], които обаче се отличават с висока цена и сложен монтаж.

За установяване на силите, действащи върху токоприемника на ТМ и пространственото му разположение в тримерното пространство е проектирана и реализирана измервателна система, която се монтира на стойката на плъзгачите, непосредствено под тях. Системата измерва статични и линейни ускорения и ъгловите скорости по три направления. За предпазване на системата от влиянието на електромагнитното поле създадено от тяговото напрежение и консумирания ток от тяговите електродвигатели, същата е поставена в кутия, изработена от стоманени профили. В кутията е поставена и предвидената за захранване акумулаторна батерия. Данните се записват на SD карта и след това се обработват, за да се оценят динамичните параметри на токоприемника. От получените данни са определени и ъглите, на които се отклонява токоприемника спрямо началното положение на покой (преди тръгване).

ЕЛЕМЕНТИ ЗА РЕАЛИЗИРАНЕ НА ИЗМЕРВАТЕЛНАТА СИСТЕМА

При наличие на повреди по релсовия път, възникват сили, които предизвикват наклоняване и люлеене по трите оси на ТМ, което се предава и на токоприемниците. За оценяване на силите, които възникват по трите оси на токоприемника, може да се използват възникналите ускорения в него. Този метод е използван в [1], където ускоренията са измерени на тавана в салона на ТМ и са приведени по

аналитичен път към токоприемника. За да бъде елиминирано привеждането на ускоренията и евентуалните неточности свързани с това, е предложено да се измерват ускоренията на самият токоприемник. Това решение налага изискване към системата, тя да бъде напълно автономна, без възможност за наблюдаване на данните в реално време. Тя трябва да бъде защитена и от въздействието на електромагнитното поле създадено от тяговия ток. Удовлетворяването на двете изисквания е системата да се монтира в стоманена кутия. Захранването се осъществява от акумулаторна батерия, която се поставя вътре в кутията. Получаваните данни от сензорите се записват на SD карта. Предвидена е индикация върху подвижният капак на кутията, за това че се получават и записват данни. За измерване на специфичните сили действащи на токоприемника е използван триосен акселерометър. Той реагира на наклон, инерциално ускорение, ударно въздействие или вибрации. За измерване на ъгловата скорост на токоприемника е използван триосен жирокоп. Тя се определя на базата на възникващото Кориолисово ускорение. Този тип сензори дават точно измерване на ъгловата скорост, дори и при наличието на смущаващи вибрации и удари. За конкретната реализация е избран инерциалният измервателен модул BNO055 на фирмата Bosch [6]. Той обединява под един корпус необходимите акселерометър, жирокоп и магнитометър. Последният не е използван при конкретните измервания, предвид разположението на модула в метална кутия и при въздействие на силно електромагнитно поле. Модула е произведен по технологията микроелектромеханична система (MEMS). За интегриране на данните от трите сензора в модула е вграден 32-битов микроконтролер, работещ с патентован софтуер BSX3.0 Fusion Lib и включен сензор за температура. Това дава възможност модула да бъде програмиран в различни режими, посредством които може да бъде определена

относителната или абсолютната ориентация получена под формата на кватерниони или ъгли на Ойлер. Върху акселерометъра въздейства както гравитационната сила, така и други ускорения, породени от движението на ТМ. Чрез предоставените функции е възможно да се отделят двата източника на ускорение и по този начин да се предоставят отделно линейното ускорение и гравитационния вектор.

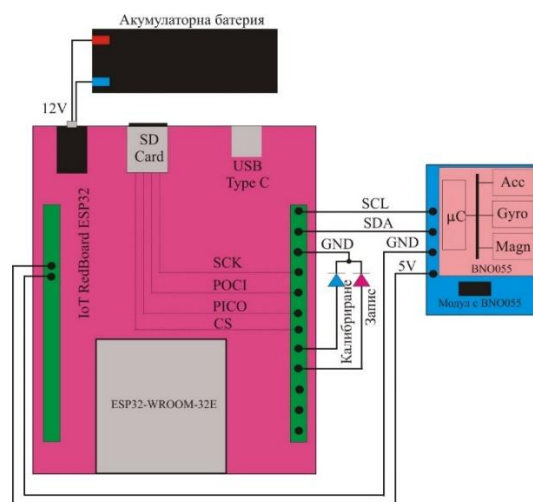
За четене и съхраняване на данните от инерциалния модул BNO055 е използван модулът ESP32-WROOM-32D [7]. От разнообразните интерфейси, които предоставя модула, са използвани два серийни интерфейса - I2C за връзка на BNO055 и SPI за свързване на SD модула. Възможностите за връзка посредством Wi-Fi и Bluetooth не са използвани на този етап поради опасения за несигурно предаване на данните в сложната електромагнитна обстановка. Модулът е интегриран върху система за развитие с наименование SparkFun IoT RedBoard-ESP32 [8]. Тя предоставя вграден модул за SD карта, възможност за захранване от различни източници на захранващо напрежение. При захранване с LiPo батерия е предвидена възможност за индикация за нивото на заряд на батерията. Има вградена операциона система freeRTOS с LwIP, както и вграден криптографски протокол. Поддържа се и криптирано надграждане по въздуха на програмното осигуряване на работеща система. За програмиране на модула може да се използва средата за развитие предлагана от фирмата Ардуино. За целта фирмата SparkFun е разработила необходимото ядро от инструкции за интегриране на двудърения 32 битов микропроцесор Xtensa LX6 към средата за развитие на Ардуино, така че наличните библиотеки и готови кодове за различни приложения да бъдат използвани и от тази система.

БЛОКОВА СХЕМА НА ИЗМЕРВАТЕЛНАТА СИСТЕМА

Изброените елементи са монтирани в кутия изработена от стоманени профили

с размери $140 \times 140 \times 70$ mm. В този обем е разположена и акумулаторна батерия с размери $90 \times 40 \times 50$ mm. Блокът на измервателната система е показана на фигура 1.

Към системата за развитие SparkFun IoT RedBoard-ESP32 по I2C интерфейс е включен модулът с BNO055. На него има вграден преобразувател на напрежение от 5V на 3.3V. Логическите нива на инерциалния модул са 3.3V, каквито са и логическите нива на системата за развитие. При включване на системата след нейното първоначално инициализиране е предвидено да бъде направено пълно калибриране на всички сензори от инерциалния модул. За това, че процеса на калибриране е започнал потребителят може да разбере от мигащия с честота 5Hz светодиода. Той е монтиран върху капака на кутията. Когато стойностите на параметрите за калибриране на всички сензори и на системата станат равни на три, светодиода изгасва и веднага се включва светодиода индикиращ, че е започнал да се изпълнява основния цикъл на програмата за събиране на данни и те се записват в SD картата. Двата светодиода са включени към изводи с общо предназначение (GPIO) на микропроцесора, които са програмирани като изходи. За настройка на различните режими на работа на инерциалния модул е използвана библиотеката Adafruit_BNO055.



Фиг. 1. Блокова схема на измервателната система

При първоначалното инициализиране се избира режима на интегриране на данните от отделните сензори. В конкретния случай е избрано да се работи с данните от акселерометъра и жироскопа. С вградените алгоритми в библиотеката BSX3.0 Fusion Lib, от данните на тези два сензора, се изчисляват ъглите на Ойлер и кватернионите. Те определят за въртането на обекта около всяка от осите



Фиг. 3. Монтирана измервателна система на токоприемника в работно положение

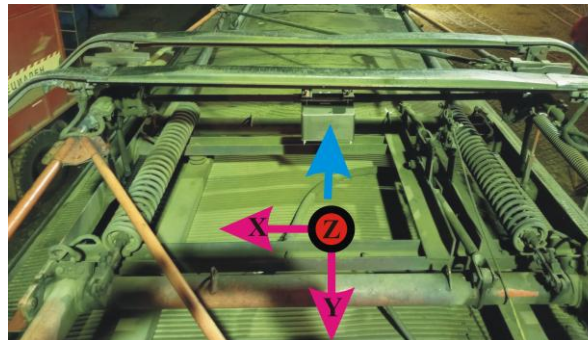
в местната координатна система (където са разположени сензорите). Предоставена е възможност за избор на формата на данните за ориентация, дали да бъдат както са определени в операционните системи Windows или Android.

Предвидено е потребителят да има възможност лесно да променя честотата на вземане на отчети от сензорите. Максималната стойност на този параметър зависи от избраният режим на работа, като най-високата стойност е 100Hz. Има възможност за избор на обхвата на измервания параметър, честотната лента и режима на работа на всеки един от сензорите.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

Измерването е направено през нощта, след приключване на трамвайното движение, с трамвайна мотриса тип Т6А2-

BG, с инвентарен № 3005. ТМ е оборудвана със симетричен токоприемник тип KE28, разположен съсно над първата талига. Измервателната система монтирана под плъзгачите на токоприемника е показана със синя стрелка на фигура 2, при свален токоприемник.

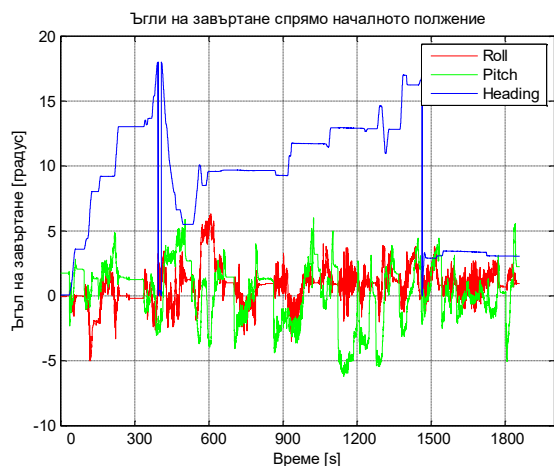


Фиг.2. Монтирана измервателна система при свален токоприемник

На същата фигура са показани как са ориентирани осите на отделните сензори. Оста Y съвпада с надлъжната ос на трамвайната мотриса. Когато действа сила по посока на стелката, на изхода на сензора се получава положителна стойност. Оста Z е ориентирана нагоре. На фигура 3 е показана системата (с червена стрелка) когато токоприемника е в работно положение.

За конкретното измерване честотата на вземане на отчети от сензорите е 25 Hz. Обхватът на акселерометъра е 4g, с честота на среза на цифровия филтър на входа 15,63 Hz и нормален режим на работа (сензора е постоянно включен). Жирокопът е с обхват 2000°/s при честотна лента от 32 Hz и нормален режим на работа.

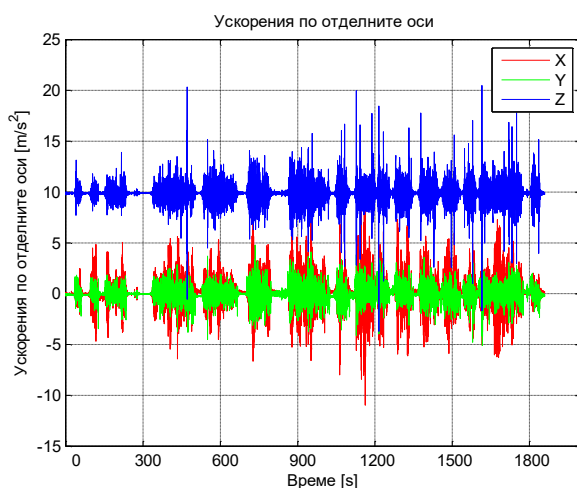
Маршрутът, по който е направено измерването е депо „Банишора“ - бул. „Княгиня Мария Луиза“ - наядсно по ул. „П. Алабин“ - пл. „Македония“ - бул. „Хр. Ботев“ - наядсно по ул. „Струга“ - наляво по бул. „Княгиня Мария Луиза“ - наляво бул. „Хр. Ботев“ и обратно по същия маршрут. Първата част от маршрута е показана на фигура 4.



Фиг. 7. Стойности на трите ъгъла на Ойлер при първата обиколка

На фигура 5. е показана част от маршрута на връщане – от началото на бул. „Хр. Ботев“ на гаровия площад до Централна автогара на бул. „Княгиня Мария Луиза“.

Маршрутът на измерването е избран



Фиг. 6. Ускорения по трите оси при първата обиколка

така, че да включва трамваен релсов път в различно техническо състояние. С цел установяване на вредното влияние на пътя върху токоприемника по-голямата част от избрания маршрут са участъци с предаварийно и аварийно състояние. Характерните повреди на релсовия път, влияещи на токоприемника вследствие на наклоняване на коша и/или вертикално подскачане на мотрисата са успоредно, шахматно и случайно пропадане на релсите.



Фиг. 5. Втората част от маршрута

Получените стойности на ускоренията по трите оси на акселерометъра, съответстващи на първата част от маршрута са показани на фигура 6.

Тези стойности ще бъдат използвани за изчисления на силите, които действат на токоприемника.

Както бе описано при първоначалното инициализиране е избрано данните от акселерометъра и жирокопа да се интегрират, в резултат на което се получава относителното ориентиране на токоприемника спрямо началното му положение. Това става с определяне на трите ъгъла на Ойлер, които носят информация за отклоненията на токоприемника, фигура 7.

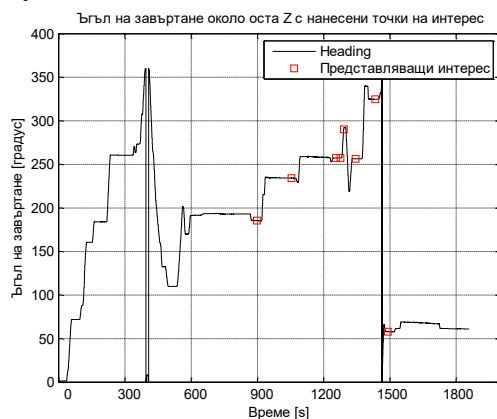
На нея са показани стойностите на трите ъгъла, като стойностите на Heading са намалени 20 пъти с цел да може по-добре да се видят стойностите на Roll и Pitch. За да има възможност за определяне къде точно са предизвикани съответните ускорения и отклонения в ъглите на Ойлер е монтиран навигационен приемник(НП) върху покрива на трамвайната мотриса. Данните от него се записват в SD карта.

След края на експеримента събраните данни се обработват и записват в масив съдържащ географските координати и времето в секунди от началото на денонощието. Данните от измервателната

система се съхраняват също в масив, в колоните на който се записват параметрите на избраните сензори и времето. То се записва като секунди от началото на включване на захранващо напрежение.

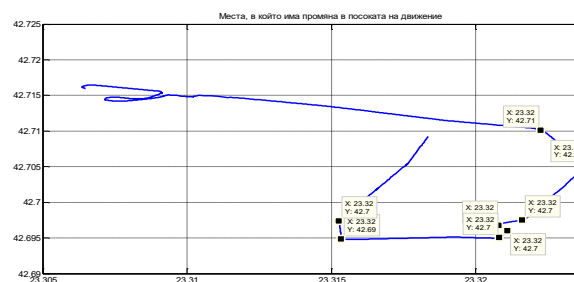
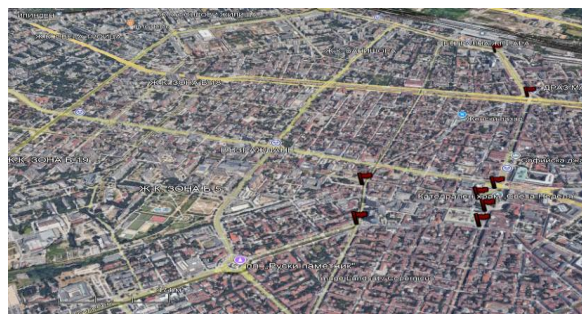
Използвана е функцията *millis*, която отброява милисекундите от стартиране на програмата. Затова времето на включване се отчита и записва (ръчно). Интерес представляват данните получени след потегляне на трамвайната мотриса, затова събраните данни от включване на системите до потегляне са премахнати. Получени са два работни масив, в които времето е с начална стойност нула и съответства на тръгване на трамвайната мотриса. Това дава възможност да се извличат данни записани по едно и също време, въпреки различните размери на двата масива. Данните от НП за време, географска дължина и ширина се записват всяка секунда, докато данните от сензорите са с двадесет и пет отчета в секунда.

Предвидена е възможност да бъдат получени данните за дадена точка или



Фиг. 9. Какви са стойностите на *Heading* в точките представляващи интерес участък, които са посочени с курсора върху трасето изчертано в Google Earth, фигура 8.

Показаните координати с курсора се записват в променливи, които са част от функция за намиране на индексите на елементи, чийто координати съвпадат със записаните в тях. На фигурата са показани точки, в които има промяна в посоката на движение на трамвайната мотриса. Те са отбелязани с флагчета. За



Фиг. 8. Места, представляващи интерес

по-голяма яснота същите точки са изчертани върху графика получена от географските координати. С полученият индекс от масива(от НП) се извлича съответстващото време на тези координати. Тази стойност на времето се търси в масива от данни(получени от сензорите), за да ѝ се намери нейният индекс.

С него вече се извличат съответстващите параметри на сензорите. По този начин са изчертани същите места на интерес върху графиките на направление(*Heading*), фигура 9. Така може да се получат и данните от сензорите при същите тези координати.

Този алгоритъм на извличане на данни в точки представляващи интерес ще бъде използван за изчисляване на силите действащи на токоприемника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Планираният и реализиран експеримент с използване на разработената система и получените резултати показват, че системата позволява определяне на пространственото разположение на токоприемника на ТМ.

Разработените алгоритми за обработка на получените данни дават възможност за получаване на стойностите на отделните сензорите, за всяка една точка

от трасето, представляваща интерес за потребителя. На база на получената информация от сензорите за линейно и ъглово ускорение могат да се определят и силите, действащи върху токоприемника. На тази база ще бъдат установени причините за посочените повреди по токоприемниците.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Mihaylov Emil M., Emil Iontchev, Rosen Miletiev, Metodi Atanasov, Rashko Vladimirov, Comparative analysis of the effect of lateral swinging of the tram body on different types of electrical current collectors, XI International Conference “Heavy Machinery-HM 2023”, Vrnjačka Banja, 21– 24 June 2023, pp B.95-100, ISBN-978-86-82434-01-6

[2] Lalev Todor, Study of the possibilities for increasing the operational indicators of the traction power supply system by digitalization, Mechanics, Transport, Communications, vol. 22, issue 3/2, 2024, article No. 2504, ISSN 1312-3823, <http://www.mtc-aj.com>

[3] Tengjiao Jiang, Gunnstein T. Frøseth, Petter Nåvik, Anders Rønnquist, Assessment of pantograph-catenary interaction in a railway overlap section via a novel optical-based method, Mechanism and Machine Theory, Volume 177, November 2022, 105045

[4] Song Y., Jiang T., Nåvik P, Geometry deviation effects of railway catenaries on pantograph–catenary interaction: a case study in Norwegian Railway System. Rail. Eng. Science 29, 350–361 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00251-0>

[5] S. Gao, Automatic Detection and Monitoring System of Pantograph–Catenary in China’s High-Speed Railways, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 70, pp. 1-12, 2021, Art no. 3502012, doi: 10.1109/TIM.2020.3022487

[6] BNO055 Intelligent 9-axis absolute orientation sensor, Bosch Sensortec, Document number BST-BNO055-DS000-18, October 2021, <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bno055-ds000.pdf>, accessed 09/2025

[7] ESP32-WROOM-32D & ESP32-WROOM-32U, Datasheet Version 2.6, Espressif Systems (Shanghai) Co., 2025-08-05, https://espressif.com/documentation//esp32-wroom-32d_esp32-wroom-32u_datasheet_en.pdf, accessed 09/2025

[8] SparkFun IoT RedBoard - ESP32 Development Board, <https://www.sparkfun.com/sparkfun-iot-redboard-esp32-development-board.html>, accessed 09/2025.